



Campos dos Goytacazes/RJ

## SEGURANÇA HÍDRICA E ENERGÉTICA NA BACIA DO PARAÍBA DO SUL DIANTE DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS – 2: GERAÇÃO DE ENERGIA E ABASTECIMENTO HUMANO

*Erica Acioli Canamary<sup>1a</sup>; Javier Tomasella<sup>1b</sup>; Victor Marchezini<sup>2</sup>; Ana Carolina Encarnação Paiva<sup>1c</sup>; Minella Alves Martins<sup>1d</sup> & Diovana de Moura Silva<sup>1e</sup>*

**RESUMO** – O Brasil muitas vezes é caracterizado pela abundância de água, entretanto eventos recorrentes de escassez hídrica nas diversas regiões do País e os múltiplos impactos que podem ser desencadeados e intensificados pelo processo de mudanças climáticas, demonstram a importância da gestão contínua desse recurso. Uma região que tem sido considerada uma alternativa para garantir as demandas hídricas de importantes centros para o desenvolvimento do País, tanto internos como externos as suas fronteiras, é a Bacia do Paraíba do Sul (BPS). Considerando a importância da transposição da BPS para a bacia do Guandú para o atendimento das demandas hídricas e energéticas da região metropolitana do Rio de Janeiro, o presente trabalho tem como objetivo a análise da variabilidade futura dos recursos hídricos, tendo como principal foco a transposição para a bacia do Guandú, e a variabilidade da geração de energia BPS, considerando o processo de mudanças climáticas. A comparação das projeções das vazões e quantidade de energia gerada em cenários futuros com o cenário de referência, mostram uma elevada influência dos processos climáticos nas variações da disponibilidade hídrica da bacia, além de uma tendência geral de redução da disponibilidade hídrica, principalmente nos cenários de maiores emissões de gases do efeito estufa.

**ABSTRACT**– Brazil is often characterized by an abundance of water. However recurrent events of water scarcity in the different regions of the country and the multiple impacts that can be triggered and intensified by the process of climate change, demonstrate the importance of continuous management of this resource. A region where it has been considered an alternative to guarantee the water demands of important centers for the development of the country, inside as outside its borders, is the Paraíba do Sul Basin (PSB). Considering the importance of Guandú basin water transferring to meet the water and energy demands of the metropolitan region of Rio de Janeiro, the present study aims to analyze the future variability of water resources, with main focus on the water transfer to the Guandú basin, and the PSB's power generation variability, considering the process of climate change. The comparison of the projections of the flows and amount of energy generated in future scenarios with the reference scenario, show a high influence of climatic processes in the variations of water availability in the basin, in addition to a general tendency of reduction of water availability, mainly in the scenarios of higher greenhouse gas emissions.

**Palavras-Chave** – Mudanças climáticas, disponibilidade hídrica.

1) INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais: Av. dos Astronautas 1758, <sup>a</sup> [erica.canamary@inpe.br](mailto:erica.canamary@inpe.br); <sup>b</sup> [javier.tomasella@inpe.br](mailto:javier.tomasella@inpe.br); <sup>c</sup> [carolmeteoro@gmail.com](mailto:carolmeteoro@gmail.com); <sup>d</sup> [minella.martins@gmail.com](mailto:minella.martins@gmail.com); <sup>e</sup> [dbms10@gmail.com](mailto:dbms10@gmail.com)

2) CEMADEN – Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais: Estrada Dr. Altino Bondensan 500, [victor.marchezini@cemaden.gov.br](mailto:victor.marchezini@cemaden.gov.br)



Campos dos Goytacazes/RJ

## 1. INTRODUÇÃO

Ao longo dos anos, diversos estudos têm observado uma maior variabilidade na disponibilidade dos recursos hídricos e, conseqüentemente uma redução na confiabilidade do suprimento da demanda (Hagen et al., 2022). Essa preocupação ficou evidente na Região Sudeste, entre os anos de 2014 e 2015, considerado o período mais seco e quente desde 1961 e que resultou não apenas em perdas econômicas, mas também sociais e ambientais. São exemplos desses impactos a limitação da operação de escolas e hospitais, o aumento do preço da energia e de alimentos, redução da produtividade agrícola (Nobre et al., 2016). Como resultado deste evento climático, o governo do Estado de São Paulo propôs uma nova transposição na Bacia do Paraíba do Sul (BPS), interligando a represa de Jaguari à represa de Atibainha localizada no Sistema Cantareira. Assim, a BPS, além de prover água às cidades localizadas na sua área de drenagem, tornou-se uma fonte de suprimento de água bruta da ordem de 5,13 m<sup>3</sup>/s de água para o sistema Cantareira (ANA, 2017) e de 119 m<sup>3</sup>/s para a bacia do Rio Guandú (ANA, 2015).

A tendência de intensificação da variabilidade hídrica, em decorrência da combinação de processos, como o aumento da demanda de água, alterações da cobertura de regiões fundamentais para a formação de chuvas e as mudanças climáticas (Chagas, Chaffe and Blöschl, 2022), gera preocupações sobre as possíveis conseqüências desse processo sobre a disponibilidade de recursos, tanto hídricos como energéticos na BPS. Portanto, esse artigo tem como objetivo verificar, para múltiplos cenários futuros, o atendimento da transposição para a Bacia do Guandú, além das mudanças na capacidade de geração de energia, em um contexto de incidência de mudanças climáticas e de uso da terra.

## 2. METODOLOGIA

### 2.1. Área de Estudo

A BPS (Figura 1), com uma área de drenagem de 57.172 km<sup>2</sup>, tem como rio principal o rio Paraíba do Sul, cuja nascente está localizada no município de Cunha, em São Paulo, atravessa 1.150 Km ao longo dos Estados de São Paulo, Minas Gerais e Rio de Janeiro, até desaguar em São João da Barra (CEIVAP, 2021).

Em virtude da disponibilidade dos dados e da existência de estudos na região, no presente trabalho foi considerada a parcela da bacia que se estende desde a porção paulista, até parte do Estado

do Rio de Janeiro, no Reservatório de Santa Cecília, onde é realizada a transposição das águas para complementar o abastecimento da bacia do rio Guandu. As análises serão realizadas considerando sete sub-bacias, apresentadas na Figura 1, segundo divisão detalhada na primeira parte desse artigo (Paiva et al., 2023).

Os principais aproveitamentos hidrelétricos, cujos reservatórios são destacados na Figura 1, possuem uma capacidade instalada de 386,67 MW, o que representa 24,5% do total da capacidade instalada das usinas em operação na BPS, segundo dados da ANEEL. As características desses reservatórios são detalhadas na Tabela 1.

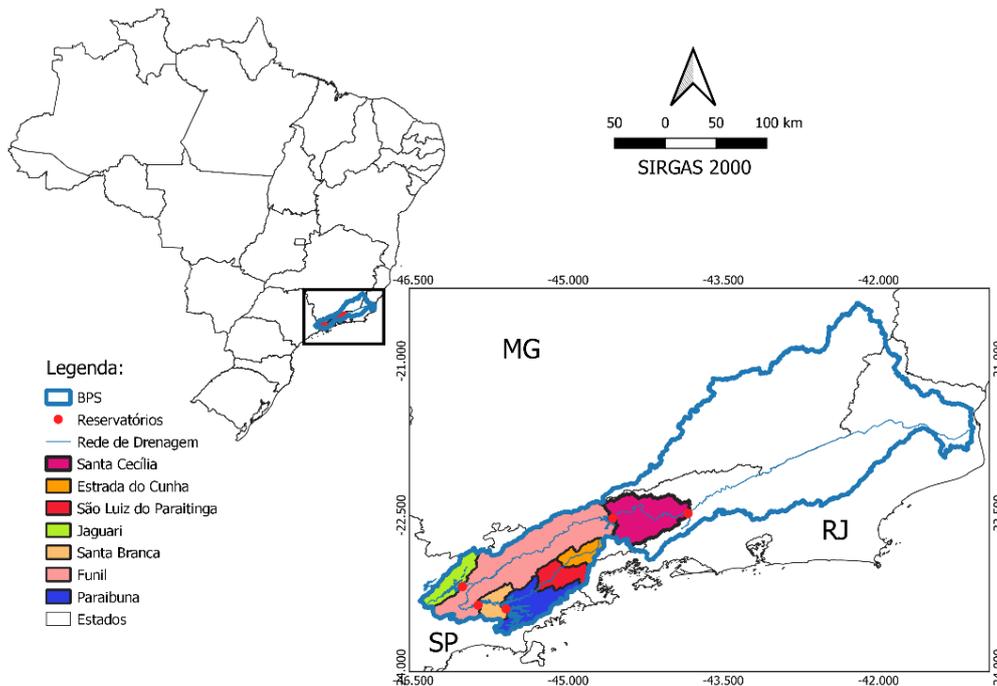


Figura 1. Delimitação da Área de Estudo

Tabela 1. Características dos reservatórios da área de estudo.

Reservatório	Capacidade Instalada (MW)	Operação	Volume Útil (hm <sup>3</sup> )
Jaguari	27,60	Acumulação	793
Paraibuna	87,02	Acumulação	2636
Santa Branca	56,05	Acumulação	308
Funil	216	Acumulação	606
Santa Cecília	-	Fio d'água	-



Campos dos Goytacazes/RJ

## 2.2. Modelo Hidrológico

A disponibilidade hídrica foi estimada usando o modelo MHD-INPE, que um modelo hidrológico determinístico e distribuído, que vem mostrando resultados satisfatórios ao ser aplicado em diferentes bacias do País. Um exemplo é o estudo realizado por Caroline Negrão et al. (2017) que verificou a qualidade da previsão de vazão na BPS, com o uso do MHD-INPE, tendo como foco eventos extremos observados em São Luís do Paraitinga, entre dezembro de 2009 e janeiro de 2010.

A calibração do MHD-INPE na área de estudo escolhida é descrita na primeira parte desse artigo (Paiva et al., 2023). O trabalho atual propõe melhorias na quantificação das demandas hídricas consideradas.

## 2.3. Cenários Futuros

### 2.3.1. Uso e ocupação do solo e Demanda por Água

Para composição dos mapas de uso e cobertura da terra foi considerado o trabalho realizado por Rezende et al. (2018) que projetaram três cenários futuros de mudanças de uso e ocupação, entre os anos de 2010 e 2050, com foco nas transições entre as classes de silvicultura, floresta e pasto. Esses mapas foram modificados por Paiva et al. (2020) que incorporaram a expansão de áreas urbanas. Por fim, aos cenários inicialmente propostos por Rezende et al. (2018), foram inseridas premissas relativas ao comportamento das demandas de água para abastecimento humano e industrial, conforme descrito a seguir:

- a) Otimista (O): Aumento das taxas de acesso aos serviços de abastecimento público. A maior preocupação com a manutenção da disponibilidade dos recursos naturais estimula uma redução no consumo per capita de água.
- b) Pessimista (P): Melhora dos níveis de acesso aos serviços de abastecimento de água e aumento da demanda per capita.
- c) Atual (A): considera as tendências atuais;

Para determinar a quantidade de água retirada dos mananciais, foram utilizadas as demandas por imóvel medidas pela Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo (SABESP). Para aqueles municípios não atendidos pela empresa, foram considerados os dados disponíveis no Sistema de Informações sobre Saneamento Básico (SNIS), sistema de coleta de dados sobre o saneamento que



Campos dos Goytacazes/RJ

disponibiliza anualmente um diagnóstico sobre a situação desse serviço no País. Quanto as projeções referentes aos cenários otimista e pessimista, os dados de consumo per capita atuais por município foram agrupados em função do volume consumido e a estimativa futura se baseou na média dos desvios padrões anuais das demandas municipais.

O total de água retirado dos mananciais é resultado da soma do consumo de água projetado por município e as perdas no sistema de distribuição.

Outra demanda incluída no presente estudo se refere à atividade agrícola. A demanda de água para agricultura foi extraída de Martins et al. (2023), que avaliou os impactos das mudanças climáticas na produção de arroz na porção paulista da BPS usando o modelo agrícola AQUACROP, considerando os mesmos cenários climáticos adotados no presente estudo. Essa cultura foi escolhida devido a elevada demanda hídrica necessária para o seu desenvolvimento. Nesse contexto, para os cenários atual e pessimista foi adotada a técnica de manejo de irrigação contínua, já para o cenário otimista, considerando um uso racional dos recursos hídricos, optou-se pela técnica de irrigação intermitente.

Os níveis de acesso da população ao sistema de abastecimento de água e as perdas de água na rede de distribuição considerados nos cenários são detalhados na Tabela 2:

Tabela 2. Acesso aos Serviços de Saneamento.

Indicador	Otimista		Pessimista	
	2030	2050	2030	2050
Perdas de Água na Distribuição	30%	20%	45%	30%
Acesso ao Sistema de Abastecimento de Água	100%	100%	100%	100%

### 2.3.2. Mudanças climáticas

Em cada um dos cenários de demanda hídrica considerados, foram incorporados os dados climáticos do downscaling dinâmico do modelo regional Eta forçado por três modelos climáticos globais, o HadGEM2-ES, o MIROC5 e o CanESM2, considerando dois cenários de emissões de gases do efeito estufa, RCP 4.5 e 8.5. Esses dados são largamente aplicados em estudos que avaliam possíveis impactos das mudanças climáticas na disponibilidade de recursos sob os cenários climáticos futuros. Em seu estudo, Dereczynski et al. (2020) mostraram que os três modelos climáticos Eta-HadGEM2-ES, Eta-MIROC5 e CanESM2-Eta representam com qualidade as variações na

temperatura na América do Sul, enquanto a precipitação simulada, mesmo apresentando diferenças em relação aos dados observados, é satisfatoriamente representada pelos modelos.

As simulações no tempo futuro foram divididas em diferentes períodos: entre os anos de 2016 e 2035 (F1) e de 2036 a 2050 (F2). Já o período de referência foi fixado entre os anos de 1996 a 2015.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para analisar a manutenção da transposição das águas da BPS para a Bacia do Guandú, foi verificado o percentual de tempo em que a vazão afluente ao reservatório de Santa Cecília atendia o limite mínimo de 190 m<sup>3</sup>/s, fixado nas legislações vigentes, considerando 71 m<sup>3</sup>/s de vazão defluente mínima desse reservatório e 119 m<sup>3</sup>/s (Figura 2).

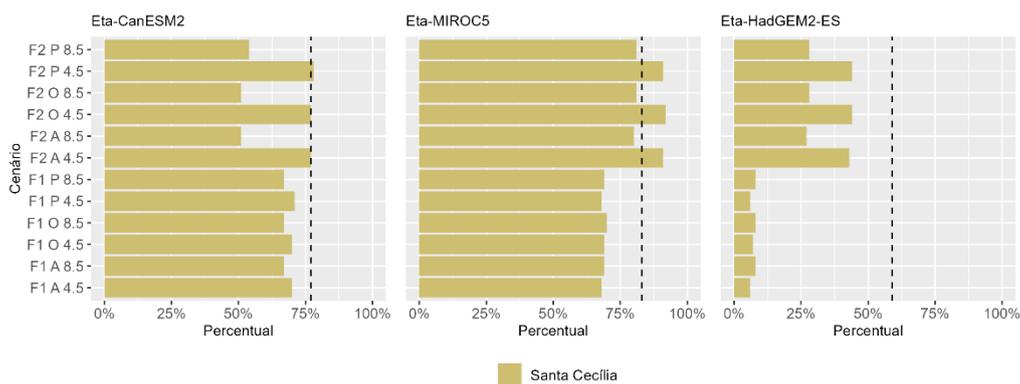


Figura 2. Percentual de atendimento à vazão mínima afluente ao reservatório de Santa Cecília, 190 m<sup>3</sup>/s, para diferentes cenários de uso e ocupação do solo (Otimista – O, Pessimista – P e Atual – A); para os cenários de emissões RCP4.5 e RCP8.5; e para os períodos de tempo F1 (2016 – 2035) e F2 (2036 – 2055). A linha vertical tracejada corresponde aos valores de referência (1996 - 2015).

Na maior parte dos cenários analisados, foi verificada uma redução do percentual de tempo em que a transposição é satisfeita em comparação ao cenário de referência (1996 – 2015). Apenas nas projeções referentes ao modelo MIROC5, considerando o cenário de menores emissões de gases de efeito estufa, RCP 4.5, ocorre um perceptível aumento desse percentual, no cenário F2 (2036 – 2055).

As diferenças observadas entre os cenários de emissões, RCP 4.5 e 8.5, são mais significativas que as associadas às mudanças de uso e ocupação do solo, ou que consideram a aplicação de políticas públicas de redução do consumo de água e das perdas na rede, ou mesmo as variações nas técnicas de irrigação (otimista, pessimista e atual). Esse comportamento pode ter sido influenciado pela menor magnitude das mudanças de uso e ocupação da terra projetadas para períodos futuros, em comparação com o histórico da BPS, os elevados índices atuais de atendimento do sistema de abastecimento de

água e a tendência de redução das áreas de cultivo de arroz, apesar do aumento da produtividade e decréscimo a demanda por água (Martins et al., 2023).

A quantificação das potências médias geradas pelas usinas hidrelétricas (Figura 3) mostram uma redução da produção de energia referente ao cenário de maiores emissões RCP 8.5, quando comparado à referência.

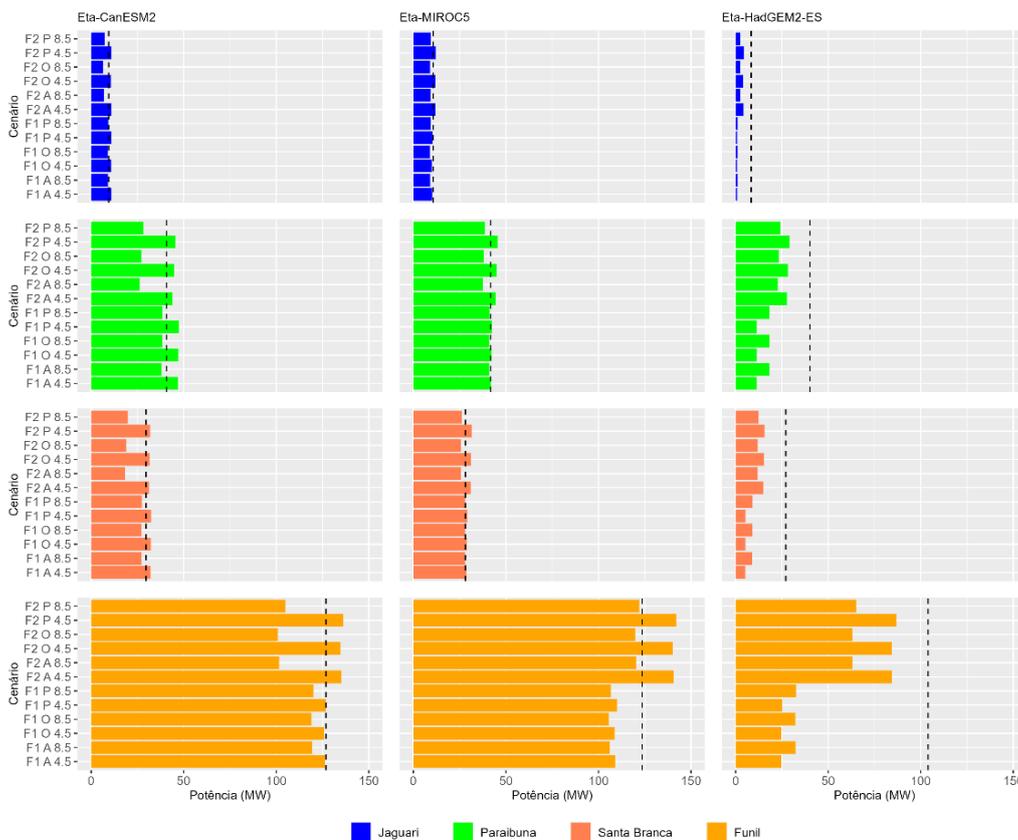


Figura 3. Média da potência gerada (MW) nas usinas hidrelétricas das sub-bacias da BPS para diferentes cenários de uso e ocupação do solo (Otimista – O, Pessimista – P e Atual – A); para os cenários de emissões RCP4.5 e RCP8.5; e para os períodos de tempo F1 (2016 – 2035) e F2 (2036 – 2055). A linha vertical tracejada corresponde aos valores de referência (1996 - 2015).

No caso dos cenários RCP 4.5 dos modelos CanESM2 e MIROC5, foram verificados acréscimos na energia média gerada em relação à referência, em todos os cenários referentes ao período F2 (2036 - 2050). As reduções da energia ocorrem apenas na usina do Funil no caso dos dados do modelo CanESM2 e em Jaguarí e no Funil para o modelo MIROC5, durante o período F1 (2016 - 2035). Esse comportamento pode ser relacionado a uma combinação de fatores, que se referem a reduções nas vazões desses reservatórios nesse cenário, a variações na ocorrência de vazões máximas e mínimas, além do maior volume de operação do reservatório de Paraibuna e, para o

reservatório do Funil, o maior valor da vazão de engolimento, máxima vazão que as turbinas suportam.

É importante mencionar que a quantidade de energia produzida em cada usina depende do volume máximo de operação do reservatório, o que influencia na capacidade de regularização das vazões. Essa característica pode estar relacionada, por exemplo, a maior energia gerada no reservatório de Paraibuna, em comparação à do reservatório de Santa Branca, apesar de eles possuírem vazões afluentes semelhantes.

Outra forma de analisar o comportamento da energia produzida nos reservatórios é com base no conceito de energia firme, associada ao risco hidrológico admitido pelo setor elétrico de 5% de insuficiência na geração. Nesse sentido, no planejamento do sistema elétrico, tenta-se garantir a não excedência desse risco. Portanto, na Figura 4, é apresentada a quantificação do percentual de tempo futuro em que a energia firme do período de referência é alcançada.

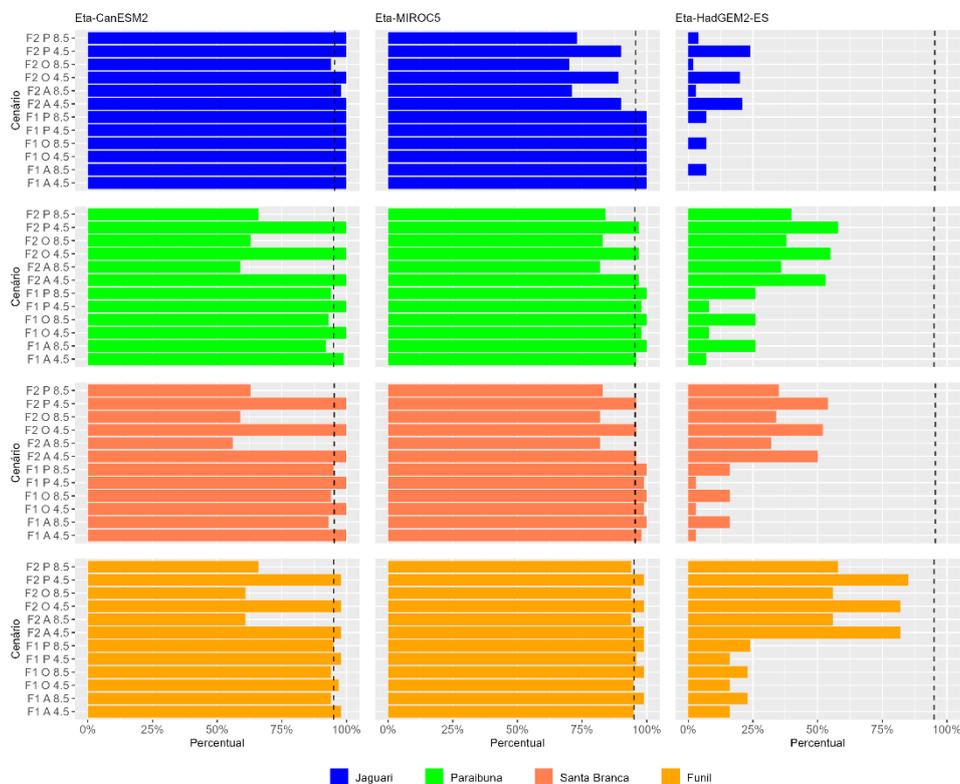


Figura 4. Percentual de tempo em que a Energia Firme do cenário de referência foi alcançada ou superada nas usinas hidrelétricas das sub-bacias da BPS para diferentes cenários de uso e ocupação do solo (Otimista – O, Pessimista – P e Atual – A); para os cenários de emissões RCP4.5 e RCP8.5; e para os períodos de tempo F1 (2016 – 2035) e F2 (20 F2 (2036 – 2055). A linha vertical tracejada corresponde aos valores de referência (1996 - 2015).



Campos dos Goytacazes/RJ

Observa-se, que a energia firme histórica não é alcançada em muitos cenários do reservatório do Jaguari, no caso das projeções do modelo HadGem2-ES, chegando o percentual a valores nulos. Outro comportamento a ser destacado são as variações entre os cenários RCP 4.5 e 8.5, principalmente durante o segundo período, o que está relacionado a maior distanciamento, entre os valores das vazões nesses períodos.

#### 4. CONCLUSÕES

Apesar das diferenças verificadas entre os cenários, as simulações realizadas na porção considerada da BPS mostram uma maior tendência de redução na disponibilidade dos recursos hídricos, o que afeta a produção de energia. Mesmo com a aplicação de algumas políticas públicas, como elevação do acesso aos serviços de saneamento, redução da demanda por água em diferentes atividades e conservação das áreas de floresta, não se verifica mudanças significativas entre os cenários pessimista, otimista e atual. O fator que principalmente interfere nos resultados são as condições climáticas, influenciadas pelas emissões de gases do efeito estufa.

Para fins de comparação dos cenários atuais e futuros, a operação dos reservatórios seguiu a mesma premissa para o cenário de referência e os futuros, baseado na energia firme calculada para o cenário atual. Esta operação não leva em conta outras demandas como abastecimento nem a otimização da cascata de reservatórios e a operação integrada do SIN. Uma vez que a lei de águas estabelece abastecimento humano e animal como prioritário, podem ser exploradas outras regras de operação que reduzam o percentual de falhas no abastecimento do gandu.

Nesse contexto é perceptível a ocorrência de mudanças o comportamento das vazões da BPS em virtude das condições climáticas futuras. Portanto, é imprescindível a atuação dos gestores com o objetivo de incentivar programas e estudos relacionados a uma utilização mais eficaz dos recursos disponíveis, como o estímulo ao reuso de água, à expansão de alternativas as fontes hídricas de geração de energia, como a solar e a eólica, à redução do consumo de água e energia, à fiscalização do uso dos recursos, dentre outros.



Campos dos Goytacazes/RJ

## AGRADECIMENTOS

Este trabalho recebeu financiamento do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico CNPq (Processo 428995/2018-7) e da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código Financeiro 001.

## REFERÊNCIAS

- ANA. (2015). *Resolução Conjunta ANA/DAEE/IGAM/INEA n° 1.382/2015*. Disponível em: <http://www.inea.rj.gov.br/wp-content/uploads/2020/04/1382-2015.pdf>. Acesso em: 18 Julho 2021.
- ANA. (2017). *Resolução n° 1.931, de 30 de Outubro de 2017*. Disponível em: <https://www.ceivap.org.br/resolucoes/ana/2017/1931-2017.pdf>. Acesso em: 18 Julho 2021.
- Caroline Negrão, A. et al. (2017). *Previsão de Vazão de Eventos Extremos Utilizando o Modelo Hidrológico Distribuído MHD-INPE e Previsões Meteorológicas do Modelo ETA-INPE para uma Alta Resolução Espacial – Estudo de Caso: São Luís do Paraitinga (SP)*. Revista Brasileira de Cartografia 69(4), pp. 647–657.
- CEIVAP. (2021). *Plano Integrado de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba do Sul*. Disponível em: [http://18.229.168.129:8080/publicacoesArquivos/ceivap/arq\\_pubMidia\\_Processo\\_030-2018-RF01.pdf](http://18.229.168.129:8080/publicacoesArquivos/ceivap/arq_pubMidia_Processo_030-2018-RF01.pdf). Acesso em: 15 Junho 2021.
- CHAGAS, V. B. P., CHAFFE, P. L. B.; BLÖSCHL, G. (2022). *Climate and land management accelerate the Brazilian water cycle*, Nature Communications,13(1), pp. 1 - 10.
- DERECZYNSKI, C.; CHOU, S. C.; LYRA, A.; SONDERMANN, M.; REGOTO, P.; TAVARES, P.; CHAGAS, D.; GOMES, J. L.; RODRIGUES, D. C.; SKANSI, M. M. (2020). *Downscaling of climate extremes over South America – Part I: Model evaluation in the reference climate*. Weather and Climate Extremes 29, pp. 1 - 9.
- HAGEN, I.; HUGGEL, C.; RAMAJO, L.; CHACÓN, N.; OMETTO, J. P.; POSTIGO J. C.; CASTELLANOS, E. J. (2022). *Climate change-related risks and adaptation potential in Central and South America during the 21st century*. Environmental Research Letters. IOP Publishing Ltd. 17, pp. 1 - 26
- MARTINS, M. A.; TOMASELLA, J.; BASSANELLI, H. R.; PAIVA, A. C. E.; VIEIRA, R. M. S. P.; CANAMARY, E. A.; ALVARENGA, L. A. (2023). *On the sustainability of paddy rice cultivation in the Paraíba do Sul river basin (Brazil) under a changing climate*, Journal of Cleaner Production, 386, pp. 1 – 12.
- NOBRE, C. A.; MARENGO, J. A.; SELUCHI, M. E.; CUARTAS, L. A.; ALVES, L. M. (2016). *Some Characteristics and Impacts of the Drought and Water Crisis in Southeastern Brazil during 2014 and 2015*. Journal of Water Resource and Protection, 8, pp. 252-262.
- PAIVA, A. C. E.; NASCIMENTO, N.; RODRIGUEZ, D. A.; TOMASELLA, J.; CARRIELLO, F.; REZENDE, F. S. (2020). *Urban Expansion and Its Impact on Water Security: The Case of the Paraíba do Sul River Basin, São Paulo, Brazil*, Science of the Total Environment, 720, pp. 1–12.
- REZENDE, F. S.; CARRIELLO, F.; RODRIGUEZ, D. A.; NEVES, O. M. S. (2018). *Spatial and Temporal Changes in the Land Use and Cover of the Paraíba Valley in São Paulo, Brazil: Development of Future Scenarios*. Revista Brasileira de Geografia Física, 11(5), pp. 1732–1747.